

生物黑炭及其增汇减排与改良土壤意义

张阿凤, 潘根兴, 李恋卿

(南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 江苏 南京 210095)

摘 要 国际上对将农田废弃物制成生物黑炭施用于土壤作为农业增汇减排的一种关键途径的呼声越来越高。通过文献资料调研, 介绍了生物黑炭的基本性质及其碳稳定性、对农田土壤的改良效应, 并讨论其在农业增产和增汇(碳)中的作用。结果表明, 作物秸秆无氧高温热解制备的生物炭具有高度的芳香化、物理的热稳定性和生物化学的抗分解性。施用于土壤大幅度提升土壤碳库, 并因其结构性质有利于农田土壤固持养分, 提高养分利用率, 改善微生物生境, 从而达到提高土壤质量而促进作物增产的双赢效果。

关键词 生物黑炭 固碳减排 土壤改良 应对气候变化

中图分类号 S156.2 文献标志码 A 文章编号 1672-2043(2009)12-2459-05

Biochar and the Effect on C Stock Enhancement, Emission Reduction of Greenhouse Gases and Soil Reclamation

ZHANG A-feng, PAN Gen-xing, LI Lian-qing

(Institute of Resource, Ecosystem and Environment of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract There is increasing demand worldwide for application of biochar from crop residues to croplands as a key countermeasure for enhancing soil C stock and reducing greenhouse gases emission from agriculture. This paper reviews the basic properties and the decomposition stability of biochar, the beneficial effects on soil reclamation as well as in both enhancing crop yield and soil C stock by using biochar in croplands. Many works done have indicated that the biochar produced from crop residues with pyrolysis under moderate and high temperature in absence of oxygen, has a highly aromatic chemical structure, physical and biological stability against thermal and biological decomposition, increases nutrient efficiency as well as improving soil habitat for soil biota. Thus, it is believed that application of biochar will reach a win-win effect for improving soil productivity and soil C stock in agriculture.

Keywords biochar; C stock and emission reduction; soil reclamation; mitigation of climate change

人类活动下温室气体排放引起大气温室气体浓度不断攀高而导致全球气候持续变暖^[1], 应对气候变化成为当前全球社会面临的重要挑战之一。如何减少土地利用中温室气体排放、增加陆地生态系统碳汇是当前减缓气候变化研究的热点之一^[2]。农田减排增汇在减缓气候变化中具有极其重要的作用^[3]。通过生物质同化 CO₂ 而制成“生物黑炭”(biochar)并储存于土壤, 日益被接受为一种根本的 CO₂ 减排增汇途径之一^[4]。研究已经表明, 生物黑炭施用于土壤不仅快速提升土壤稳定性碳库, 而且明显改善土壤质量、提升作物生产力^[5-6], 因而可以作为农业应对气候变化的增汇增产的双赢途径^[3]。

全球估计每年有 4~8 Pg 生物量碳被焚烧, 有 0.5~1.7 Pg 碳转变成黑炭^[7]。中国农业每年产生 5 亿多吨作物秸秆生物量, 其中露天焚烧量约占 23%(1.6 亿 t), 其产生的黑炭、挥发性有机物、有机碳、一氧化碳和二氧化碳等排放分别可以占全国总排放的 11%到 6%不等^[8]。因此, 发展生物黑炭制备及其土壤处置技术, 不但是减少甚至控制秸秆露天焚烧, 促进生态系统物质循环, 而且是减少陆地温室气体排放、提升土壤碳库的迫切需求。

此项技术是根据巴西亚马逊河流域一种黑色碳化土认识的, 这种称为 Terra Preta(TP)土壤是古人类刀耕火种形成的一种特殊的肥沃土壤。人们发现这种黑色碳化土是呈斑块状分布于强风化景观下的非常贫瘠的氧化土和老成土景观中。在 TP 表土层中, 每千克有机碳中含有 100~350 g 黑炭, 在氧化土的表土层中, 每千克有机碳中含有 50~150 g 黑炭。在亚马逊

收稿日期 2009-05-20

基金项目 科技部科技支撑计划项目资助

作者简介 张阿凤(1985—), 女, 博士研究生, 从事农业固碳减排与应对气候变化研究。E-mail: 2009203024@njau.edu.cn

通讯作者 潘根兴 E-mail: gxpan@njau.edu.cn

河流域的高温高湿地区,通常土壤有机质分解十分强烈,但这种土壤的有机质在森林砍伐几个世纪后还能长期存在,这与土壤中大量的黑碳有关^[9-11]。本文在回顾国际生物黑炭技术发展历程基础上,讨论生物黑炭的性质、土壤施用及其增产增汇意义,期望对我国开展生物黑炭应用研究以作为固碳减排的途径策略提供依据。

1 生物黑炭及其秸秆制备

生物黑炭是化石燃料或生物体不完全燃烧产生的一种非纯净碳的混合物,它含有 60% 以上的碳^[12],生物黑炭因碳组分的高度芳香化而具有生物化学和热稳定性。当前用于固碳减排的生物黑炭(biochar)是指各种作物秸秆在无氧条件下高温热解后的固态产物的统称,主要为纤维素、羰基、酸及酸的衍生物、呋喃、吡喃以及脱水糖、苯酚、烷属烃及烯属烃类的衍生物等成分复杂有机碳的混合物。

通过作物秸秆无氧高温热解转化为生物黑炭的成效受下列因素影响:用来制备生物黑炭原料本身的性质、热解过程中的环境条件包括温度、空气、湿度等参数的控制、热解过程中的其他矿物质和养分^[13]。很明显,热解过程中的温度在很大程度上影响生物黑炭及其副产物—生物燃料(biofuel)的产量,同时也影响所生成的生物黑炭的性质^[6]。秸秆制成生物黑炭的回收率随着热解温度的升高而降低,但生物黑炭中碳的浓度将随温度的升高而提高^[14-16]。吴成等^[17]研究表明随着热解温度升高,小麦秸秆热解提取生物黑炭比表面积增大,芳香化程度加深,表面疏水性增强。相对增加的碳含量可能补偿单位质量燃烧中因提高温度而降低的生物黑炭的产量。因此,热解过程中的温度对碳固定平衡的影响不大,一般控制在 350~500 °C 间。然而,影响生成的生物黑炭中碳的含量以及养分的有效性的因素最重要的是制备生物黑炭的秸秆原料本身的性质^[6]。如阔叶树和针叶树的掉落物经高温热解制成生物黑炭,因其灰分含量不同,分别为 6.38% 和 1.48%,当生物黑炭的量为 450 g·kg⁻¹ 施到砂土里后,导致土壤的 pH 值相差一个单位,分别为 pH 6.15 和 pH 5.15,因此阔叶树的生物黑炭在降低土壤酸度、提高土壤 pH 值比针叶树有效,并且其养分如 Ca、Mg、K 的含量阔叶树的要比针叶树的高,从而施进土壤后造成土壤阳离子交换量不同。阔叶树的生物黑炭施到砂土中增加了土壤的阳离子交换量,而针叶树的生物黑炭施进土壤后反而降低了。

2 生物黑炭的稳定性

由前述可知,生物黑炭具有多芳香环和非芳香环结构的复杂结构,使其表现出高度的化学和微生物惰性,施进土壤后难以被土壤微生物利用;同时,由于其复杂成分中丰富的碳水化合物、长链烯烃等有机大分子,具有与土壤中的矿物质形成有机无机复合体的功能活性。正是由于团聚体的物理保护作用而降低了土壤微生物对施入生物黑炭的作用^[18]。Brodowski 等^[19]研究表明,在农业土壤中的黑碳富集于小于 53 μm 的土壤微团聚体中。Glaser 等^[20]对巴西热带土壤中的黑碳研究表明,被有机无机复合体包被的黑碳,不易被氧化和微生物利用。而土壤团聚体的碳保护能力恰恰是土壤自然固碳潜力的基础^[21]。

土壤微团聚体的物理保护以及生物黑炭本身的生物化学和热稳定性,使得生物黑炭在土壤中的周转周期很长。如巴西亚马逊河流域的(TP)土壤中黑碳经过几个世纪的氧化分解其含量仍高达 35%^[6]。而大田和室内试验则表明生物黑炭在土壤中的更新周期至少在百年尺度^[5]。尽管生物黑炭的土壤周转时间还存在不确定性,由于其生物化学和热的稳定性、抗降解性、以及对微生物的惰性,比通常的有机添加物更为稳定。施进土壤后对提高土壤碳库、减缓温室气体的排放、改善土壤的质量、提高作物产量等方面有重要的作用^[22]。

3 生物黑炭施入土壤的固碳减排作用

3.1 增汇作用

土地利用引起的土壤碳库损失是大气温室气体浓度不断升高的主要驱动力^[3],而陆地生态系统包括土壤增汇是《京都议定书》中接受的减排机制之一^[23-24]。在陆地生态系统中,植物光合作用固定的大气二氧化碳,50% 用于自身呼吸作用,而另外的 50% 通过凋落物的形式归还土壤,其经过土壤微生物的作用释放到大气中,这个平衡称之为“碳中性”(carbon neutral)。如果凋落物经过高温热解,可产生 25% 的生物黑炭归还土壤,由于生物黑炭的化学和微生物惰性以及土壤团聚体的物理保护使得其成为土壤的惰性碳库,只有 5% 的碳经过土壤微生物的作用重新释放到大气,而土壤多固定了 20% 的碳,这样就产生净的碳吸收,这个平衡称之为“碳负性”(carbon negative)^[5]。Okimori 等^[25]估算,若印尼每年有 368 000 t 的作物秸秆以及废弃物通过高温热解可转化为 77 000 t 的生物

黑炭而施入土壤储存,利用高温热解的方法每年可减少 230 000 t CO₂ 的排放。Lenton 等^[4]展望到 2100 年,人类活动排放的二氧化碳量的 1/4 将可以通过处理废弃有机质得到的生物黑炭进行封存,这可能降低大气中二氧化碳浓度达 40 mL·m⁻³。最近 Lehmann 等^[4]提出,运用生物黑炭技术社会经济上潜在可行的增汇量可达 9.5 Pg。

3.2 生物黑炭在土壤中的减排作用

生物黑炭施入土壤后同时也有 CH₄、N₂O 等温室气体的减排作用^[6]。Rondon 等^[26]盆栽试验表明,其土壤为典型的筒育半干润氧化土 (typic haplustox) pH 为 4.5。两种植物类型为:大豆 (Legume ICA6) 和草 (Gramine CIAT 679)。Biochar 的用量为 0、7.5、15、30 g·kg⁻¹,其中 biochar 是朱缨花属植物热解后的产物。添加 biochar 和对照相比,作物的 CH₄、N₂O 排放通量减少,可能是由于生物黑炭施入后土壤容重降低,通气性改善,加上生物黑炭的高 C/N 比,限制了氮素的微生物转化和反硝化,从而改变了农田生态系统的氮循环^[6]。生物黑炭施进土壤 N₂O 排放减弱可能还与黑炭施入后土壤 pH 升高 (见下节) 有关。而当土壤 pH 降低时,反硝化作用形成 N₂O 的比例增大。Damu 和 Shcekn (1998)^[27]监测到当土壤 pH 为中性时 N₂ 是反硝化的主要产物,当 pH 降低时则有利于 N₂O 的释放。

3.3 生物黑炭改善土壤质量和增产作用

3.3.1 提高酸性土壤 pH 值

生物黑炭含有的灰分元素如 K、Ca、Mg 都呈可溶态,施入土壤可提高酸性土壤的盐基饱和度,以提高土壤的 pH、降低酸性土中铝的饱和度。而在热带地区,土壤低的 pH 值和高的铝含量是制约作物产量的限制性因子^[28]。早期的大田试验^[29]表明,当施用 450 g·kg⁻¹ 阔叶树的生物黑炭后,其土壤 (沙土) 的盐基饱和度是原来的 10 倍。不同质地的土壤,施用生物黑炭后土壤 pH 值从 5.4 增加到 6.6。且 pH 升高幅度在粘土中比沙土和壤土要大。在巴西亚马逊河流域当生物黑炭施进后,表层土壤的 pH 值增加了 0.4 个单位^[30]。施入生物黑炭后土壤的 pH 变化是观察到的 N₂O 减少排放的主要原因之一。

3.3.2 提高土壤养分有效性

因为生物黑炭中含有丰富的有机大分子和空隙结构,施入土壤后又较易形成大团聚体,因而可能增进土壤的养分离子的吸附和保持,特别是对 NH₄⁺ 有很强的吸附作用。Lehmann 等^[31]对巴西亚马逊河流域的人为土 (TP) 试验研究,当生物黑炭和肥料配施后,土

壤中的 NH₄⁺ 吸附得到明显的促进,提高了水稻对氮的利用率,最主要的是对 NH₄⁺ 的固持作用,从而减少氮的损失。另外,生物黑炭中灰分元素如 K、Ca 和 Mg 等较为丰富,施进土壤后作为可溶性养分被作物利用。因此,施入土壤的生物黑炭不仅仅是提高了土壤碳保持容量,更重要的是本身可以作为肥料提高土壤肥力。

3.3.3 生物黑炭的增产作用

生物黑炭具有良好的物理性质和养分调控作用,施入土壤可以显著促进种子萌发和生长,从而促进作物生产力^[32]。Glaser^[13]对淋溶土 (Alfisol) 进行生物黑炭的田间试验,其施用量为 135.2 t·hm⁻² 时,作物的生物量是对照的 2 倍。Baronti 等^[33]用沙壤土的盆栽试验,当施用量为 30 和 60 t·hm⁻² 时,黑麦草 (*Lolium perenne*) 的生物量分别比对照增加 20% 和 52%,但施用量提高到 100 和 200 t·hm⁻² 时,反而比对照降低 8% 和 30%。Chan 等^[34]用采自于新威尔士南部的小牧场周围的平原的淋溶土壤 (Alfisol),其有机碳含量为 1.97% pH 为 4.5,进行了生物黑炭的萝卜盆栽试验,处理的生物黑炭用量分别为 0、10、25、50 t·hm⁻²,并设计 2 个氮肥水平 (0 和 100 kgN·hm⁻²) 在无氮肥配施处理中,生物黑炭用量为 10 和 50 t·hm⁻² 的处理增产 (和对照相比) 分别达到 42% 和 96%。生物黑炭的施用增加了土壤中养分特别是氮肥的有效性。而 Kishimoto and Sugiura 等^[35]在火山灰土 (Volcanic ash soil) 对大豆和玉米的田间试验表明,施用生物黑炭分别为 5 和 15 t·hm⁻² 时,大豆和玉米表现减产。其原因可能是生物黑炭施用后提高了土壤 pH 值,从而降低了磷和某些微量元素有效性。因此,生物黑炭的增产作用及适宜用量还需视农田作物类型、土壤类型和性质、以及施肥情况而定。

4 结论与展望

由于我国是世界上平均土壤碳密度较低的国家,这一方面说明我国生态系统总体质量较低,但同时也应看到其固碳减排的巨大空间。因此,需要运用高温热解这项固碳减排增汇技术来增加中国土壤有机碳含量^[36]。从我国作物秸秆的利用情况、发展以及推广应用高温热解生物黑炭技术对于我国农业应对气候变化和实现粮食生产持续发展可能具有极重要的意义。我国每年产生 5 亿多吨作物秸秆,其中露天焚烧量约占 23% (1.6 亿 t)。秸秆焚烧不仅造成环境污染,增加温室气体的排放,而且浪费了可利用的生态资源,同时造成土壤肥力的下降^[8]。由上述可知生物黑炭

不仅可以增加土壤稳定性碳库,改善土壤理化性质,减少温室气体的排放,而且增加作物产量。当前,在国际上碳贸易机制基础上考虑秸秆制成生物黑炭应用是经济可行的。我们在山东曾经看到一种小型热解炉,可年产优质秸秆生物黑炭 100 万 t,广泛应用于工业、农业、民用领域,可实现年销售收入近 50 亿元人民币。需要的设备成本是 6 万元,生物黑炭生产中基本无能源消费。国际上的研究估计是,当碳贸易中每吨碳达到 37 美元(2008 年 6 月碳贸易价每吨 CO_2 45 美元)时,秸秆制生物黑炭应用是经济可行的^[37]。

我国学者也已开始注意生物黑炭的作用,并主要是围绕生物黑炭的理化性质^[38]、环境功能进行了实验研究^[39-47],但还没有开展生物黑炭应用于农田的系统试验研究。建议国家有关部门立项支持生物黑炭制备、应用的研究,加快发展生物黑炭增产增汇技术,为未来应对气候变化的可持续农业提供技术支撑。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change Mitigation of climate change. Working group III Contribution to the fourth assessment report of the IPCC[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 王勤花,曲建升,张志强,等. 气候变化减缓技术:国际现状与发展趋势[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(6): 322-327.
WANG Qin-hua, QU Jian-sheng, ZHANG Zhi-qiang. International climate change mitigation technologies: Advances and outreaches [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3(6): 322-327.
- [3] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(11): 1623-1627.
- [4] <http://env.people.com.cn/GB/8978531.html>.
- [5] Lehmann J. A handful of carbon[J]. *Nature*, 2007, 447(10): 143-144.
- [6] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems—A review [J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11: 403-427.
- [7] 马骥. 大陆农户秸秆就地焚烧的原因:成本收益比较与约束条件分析—以河南省开封县杜良乡为例[J]. 农业技术经济, 2009(2): 77-84.
MA Ji. Reasons on burning straw in situ mainland farmers: cost-benefit comparison and analysis of constraints—Taking Duryan as an example in Kaifeng, Henan Province[J]. *Agricultural Technology and Economy*, 2009 (2): 77-84.
- [8] 曹国良,张小曳,王亚强,等. 中国区域农田秸秆露天焚烧排放量的估算[J]. 科学通报, 2007, 52(15): 1826-1831.
CAO Guo-liang, ZHANG Xiao-ye, WANG Ya-qiang. China's regional agricultural straw open burning emissions estimates [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(15): 1826-1831.
- [9] Goldberg E. D. Black carbon in the environment: Properties and distribution[M]. New York, John Wiley, 1985.
- [10] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review[J]. *Biol Fertil Soils*, 2002, 35: 219-230.
- [11] Demirbas A. Carbonization ranking of selected biomass for charcoal, liquid and gaseous products[J]. *Energy Conversion and Management*, 2001, 42, 1229-1238.
- [12] Demirbas A. Effects of temperature and particle size on biochar yield from pyrolysis of agricultural residues[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2004, 72, 243-248.
- [13] Katyal S, Thambimuthu K, Valix M. Carbonisation of bagasse in a fixed bed reactor: Influence of process variables on char yield and characteristics[J]. *Renewable Energy*, 2003, 28: 713-725.
- [14] 吴成,张晓丽,李关宾. 黑碳制备的不同热解温度对其吸附的影响[J]. 中国环境科学, 2007, 27(1): 125-128.
WU Cheng, ZHANG Xiao-li, LI Guan-bin. Effects of pyrolytic temperature of phenanthrene on its adsorption to black carbon[J]. *China Environmental Science*, 2007, 27(1): 125-128.
- [15] Phillip S, Homann P, Caldwell B. Stabilization and destabilization of soil organic matter: Mechanisms and controls[J]. *Geoderma*, 1996, 74: 65-105.
- [16] Brodowski S, John B, Flessa H, Amelung W. Aggregate-occluded black carbon in soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 2006, 57: 539-546.
- [17] Glaser B, Balashov E, Haumaier L, et al. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region [J]. *Organic Geochemistry*, 2000, 31: 669-678.
- [18] 潘根兴,周萍,李恋卿,等. 固碳土壤学的核心科学问题与研究进展[J]. 土壤学报, 2007, 44(2): 327-337.
PAN Gen-xing, ZHOU Ping, LI Lian-qing. Core issues and research progresses of soil science of C sequestration[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(2): 327-337.
- [19] David A Laird. The charcoal vision: A Win-Win-Win Scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality[J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100(1): 178-181.
- [20] Annette F, Rounsevell M, Smith P, et al. Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe[J]. *Geoderma*, 2004, 122: 1-23.
- [21] Fanny M, Erik H. The potential contribution of sinks to meeting Kyoto Protocol commitments[J]. *Environmental Science & Policy*, 2001, 42: 269-292.
- [22] Okimori Y, Ogawa M, Takahashi F. Potential of CO_2 emission reductions by carbonizing biomass waste from industrial tree plantation in south Sumatra, Indonesia[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2003, 8: 261-280.
- [23] <http://soilcarboncenter.k-state.edu/conference/PowerPoint-files/Rondon-Baltimore-05-files/frame.htm>.
- [24] Daum D, Schenk M K. Influence of nutrient solution pH on N_2O and N_2 emissions from a soilless culture system[J]. *Plant and Soil*, 1998, 203: 279-287.
- [25] Tryon EH. Effect of charcoal on certain physical, chemical, and biological properties of forest soils[J]. *Ecol Monogr*, 1948, 18: 81-115.
- [26] Kauffman J B, Cummings D L, Ward D E, et al. Fire in the Brazilian Amazon. 1. Biomass, nutrient pools, and losses in slashed primary forests

- [J]. *Oecologia*, 1995, 104 :397–408.
- [27] Lehmann J, Silva J P, Rondon M, et al. Slash-and-char—a feasible alternative for soil fertility management in the central Amazon? //Soil Science Confronting New Realities in the 21st Century. 7th World Congress of Soil Science, Bangkok, 2002.
- [28] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2006, 70 :1719–1730.
- [29] Baronti S, Alberti G, Genesio L, et al. Effects on soil fertility and on crops production 2nd International Biochar Conference—IBI September 8–10 Newcastle—Gateshead, UK.
- [30] Chan K Y, Zwieten V L, Meszaros I, et al. Using poultry litter biochars as soil amendments [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2008, 46 :437–444.
- [31] Kishimoto S, Sugiura G. Charcoal as a soil conditioner[J]. *Int Achieve Future*, 1985, 5 :12–23.
- [32] 宋戴苞. 浙江省秸秆资源及其品质调查研究[J]. 土壤肥料, 1995 (2) :23–26.
- SONG Ji-bao. Straw resources and their quality of investigation and research in Zhejiang[J]. *Soils and Fertilizers*, 1995(2) :23–26.
- [33] 段佐亮. 大陆作物秸秆燃烧甲烷、氧化亚氮排放量变化趋势 (1990–2020)[J]. 农业环境保护, 1995, 14(3) :111–116.
- DUAN Zuo-liang. China crop straw burning methane, nitrous oxide emissions trends (1990–2020)[J]. *Agro-environmental Protection*, 1995, 14(3) :111–116.
- [34] 王秋华. 大陆农村作物秸秆资源化调查研究[J]. 农村生态环境, 1994, 10(4) :67–71.
- WANG Qiu-hua. Crop straw resources in rural areas of China studies[J]. *The Rural Ecological Environment*, 1994, 10(4) :67–71.
- [35] 钟华平, 岳燕珍, 樊江文. 中国作物秸秆资源及其利用[J]. 资源科学, 2003, 25(4) :62–67.
- ZHONG Hua-ping, YUE Yan-zhen, FAN Jiang-wen. Characteristics of crop straw resources in China and its utilization[J]. *Resources Science*, 2003, 25(4) :62–67.
- [36] 环境保护部. 关于进一步加强秸秆禁烧工作的通知. 环发(2008) 22号, 2008. 04. 21.
- Department of Environmental Protection. Jinshao straw work on further strengthening the notice. UNCED(2008)22, 2008. 04. 21.
- [37] 潘根兴. 中国土壤有机碳库及其演变与应对气候变化[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(5) :282–289.
- PAN Gen-xing. Soil organic carbon stock, dynamics and climate change mitigation of china[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2008, 4(5) :282–289.
- [38] <http://www.biochar-international.org/>
- [39] 程海燕, 邱宇平, 黄民生, 等. 黑碳的表面化学研究进展[J]. 上海化工, 2006, 31(10) :30–34.
- CHENG Hai-yan, QIU Yu-ping, HUANG Min-sheng, et al. Advance of research on surface chemistry of black carbon[J]. *Shanghai Chemical Industry*, 2006, 31(10) :30–34.
- [40] 程海燕. pH和溶解性有机质影响下生物炭吸附农药行为的研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2008.
- CHENG Hai-yan. pH and dissolved organic matter under the influence of black carbon adsorption of bio-pesticides behavior[D]. Shanghai : East China Normal University, 2008.
- [41] 余向阳, 张志勇, 张新明, 等. 黑碳对土壤中毒死蜱降解的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(5) :1681–1684.
- YU Xiang-yang, ZHANG Zhi-yong, ZHANG Xin-ming, et al. Effect of charcoal on the degradation of chlorpyrifos in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(5) :1681–1684.
- [42] 余向阳, 应光国, 刘贤进, 等. 土壤中黑碳对农药敌草隆的吸附-解吸迟滞行为研究[J]. 土壤学报, 2007, 44(4) :650–655.
- YU Xiang-yang, YING Guang-guo, LIU Xian-jin, et al. Hysteresis effect of charcoal on sorption and desorption of diuron by soils [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(4) :650–655.
- [43] 周丹丹. 生物炭质对有机污染物的吸附作用及机理调控[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- ZHOU Dan-dan. Adsorption of bio-carbon on organic pollutants and the mechanism of regulation[D]. Hangzhou Zhejiang University, 2008.
- [44] 余向阳. 黑碳对农药在土壤中的吸附/解析行为及其生物有效性的影响[D]. 陕西: 杨凌西北农林科技大学, 2007.
- YU Xiang-yang. Effect of black carbon on the pesticide in the soil adsorption/analytic behavior and the impact of bio-availability[D]. Yan-gling Northwest A & F University, 2007.
- [45] 刘建秋. 黑碳对乙草胺在土壤/沉积物中吸附/解析行为的影响[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- LIU Jian-qiu. Effect of black carbon on acetochlor in soil/sediment adsorption/analytic behavior[D]. Dalian Dalian University of Technology, 2008.
- [46] 吴成, 张晓丽, 李关宾. 低分子量有机酸对黑碳吸附 Pb Cd 的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5) :1383–1387.
- WU Cheng, ZHANG Xiao-li, LI Guan-bin. Effect of low molecular weight organic acids on Pb²⁺ and Cd²⁺ adsorption of black carbon[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5) :1383–1387.
- [47] 吴成, 张晓丽, 李关宾. 黑碳吸附汞砷铅镉离子的研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2) :770–774.
- WU Cheng, ZHANG Xiao-li, LI Guan-bin. Sorption of Hg²⁺, As³⁺, Pb²⁺ and Cd²⁺ by black carbon[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2) :770–774.